

# ОСОБЕННОСТИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ ВНУТРЕННЕОКИСЛЕННОГО СПЛАВА V–Cr–Zr–W ПОСЛЕ РАСТЯЖЕНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Смирнов И.В.<sup>1, 2, \*</sup>, Дитенберг И.А.<sup>2, 3</sup>, Пинжсин Ю.П.<sup>1, 3</sup>,  
Гриняев К.В.<sup>1, 2, 3</sup>, Тюменцев А.Н.<sup>1, 2, 3</sup>, Чернов В.М.<sup>4</sup>

Руководитель – доцент, канд. физ.-мат. наук Дитенберг И.А.

<sup>1</sup>Томский государственный университет, г. Томск

smirnov\_iv@bk.ru

<sup>2</sup>Сибирский физико-технический институт им. В.Д. Кузнецова, г. Томск

<sup>3</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск

<sup>4</sup>ОАО "Высokотехнологический научно-исследовательский институт  
неорганических материалов им. акад. А.А. Бочвара", г. Москва

Методами растровой электронной микроскопии проведено исследование особенностей пластической деформации и разрушения сплава V–Cr–Zr–W после растяжения при различных температурах. Установлено, что при высоких температурах испытания (800 – 1000 °С) преобладает вязкий характер разрушения. В области локализации деформации при испытаниях при 20 – 800 °С наблюдается интенсивная фрагментация зеренной структуры, внутри зерен отмечается высокая плотность малоугловых границ. Повышение температуры до 900 – 1000 °С приводит к частичному измельчению крупных зерен, в объеме зерен практически не наблюдаются малоугловые границы, пластическая деформация локализуется преимущественно вдоль границ кристаллитов.

Малоактивируемые ванадиевые сплавы являются перспективными конструкционными материалами, предназначенными для эксплуатации при высоких температурах [1]. Существенной проблемой при выплавке и обработке этих сплавов является их высокая активность к примесям внедрения, приводящая к неконтролируемому загрязнению и последующему ухудшению механических свойств. Как было показано в работах [2, 3], применение различных режимов обработок позволяет значительно модифицировать гетерофазную структуру этих материалов и повысить значения механических свойств. Тем не менее, для изучения особенностей гетерофазных структурных состояний и разработки новых способов повышения жаропрочности, важной материаловедческой задачей является исследование механизмов пластической деформации.

В настоящей работе представлены результаты исследования влияния температуры на особенности пластической деформации и разрушения сплава V–4,23 Cr–1,69 Zr–7,56 W (вес. %) после комплексной термомеханической плюс химико-термической обработки. Термомеханическая обработка

включает несколько циклов «деформация прокаткой плюс отжиг» [2]. Химико-термическая обработка проводилась по типу низкотемпературного внутреннего окисления до концентрации кислорода  $\sim 2.1$  ат. % [3]. Механические испытания образцов активным растяжением проведены при температурах 20 °С, 800 °С, 900 °С и 1000 °С. Направление растяжения при всех температурах совпадает с направлением прокатки.

Установлено, что при комнатной температуре пластическая деформация характеризуется как хрупким, так и вязким типом разрушения (рис. 1 а). При высоких температурах (800 – 1000 °С) преобладает вязкое разрушение (рис. 1 б). Отличительной особенностью при этом является формирование трещин, вязко раскрывающихся в направлении растяжения.

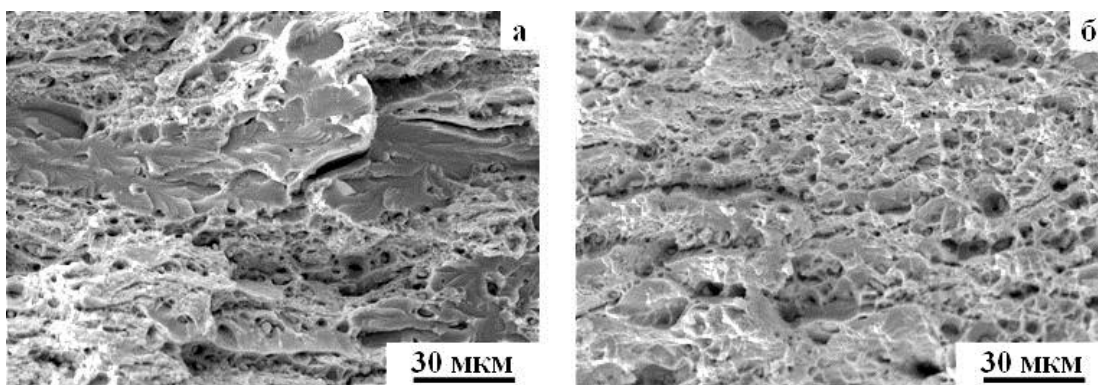


Рис. 1. Поверхность излома образцов после испытаний при 20 °С (а) и 800 °С (б). Растровая электронная микроскопия.

В результате анализа карт ориентации, полученных с использованием метода дифракции обратно рассеянных электронов (Electron backscatter diffraction – EBSD анализ) [4], установлено, что микроструктура недеформированной части образцов (рис. 2 а) представлена вытянутыми в направлении прокатки (НП), крупными зернами (длиной до 200 мкм и шириной до 20 мкм), разделенными прослойками из мелких (длиной 2 – 20 мкм и шириной 2 – 6 мкм) кристаллитов. Объемные доли крупных и мелких зерен приблизительно равны. Микроструктура в областях однородной деформации образцов после испытаний при 20 °С, 800 °С и 900 °С качественно подобна микроструктуре в недеформированной части. Увеличение температуры деформации до 1000 °С приводит к уменьшению доли крупных зерен в области однородного удлинения до 30 %.

В области локализации деформации, в зависимости от температуры испытаний, выявлены следующие особенности фрагментации зеренной структуры:

- при 20 °С и 800 °С (рис. 2 б) наблюдается частичное сохранение исходных крупных зерен, примерно 70 % объема материала занимают мелкие зерна, длиной до 10 мкм и шириной 1 – 4 мкм, внутри большей части как

крупных, так и мелких зерен формируется высокая плотность малоугловых границ с разориентировками непрерывного и дискретного типа;

– при повышении температуры испытания до 900 °С объемная доля исходных крупных зерен уменьшается до 20 % и основной объем материала при этом представлен мелкими зернами, длиной 10 – 20 мкм и шириной до 5 мкм, в объеме кристаллитов практически не наблюдается формирования малоугловых границ;

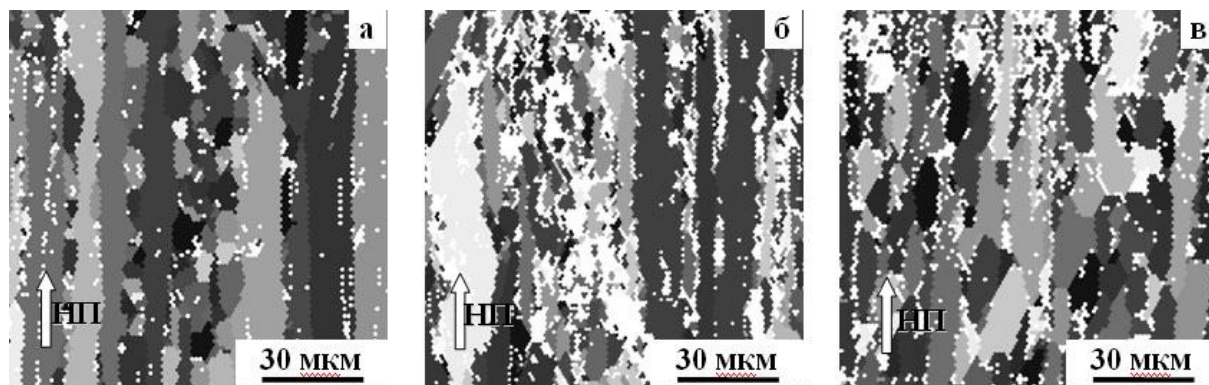


Рис. 2. Карты ориентации: с недеформированной области образца (а); полученные в области локализации деформации после растяжения при 20 °С (б) и 1000 °С (в). Растровая электронная микроскопия. EBSD анализ.

– увеличение температуры до 1000 °С (рис. 2 в) приводит только к уменьшению объемной доли крупных зерен до 7 %.

Таким образом, значительные изменения структуры в зависимости от температуры наблюдаются только в области локализации деформации. При 20 – 800 °С наблюдается интенсивная фрагментация зеренной структуры, внутри зерен отмечается высокая плотность малоугловых границ. Повышение температуры до 900 – 1000 °С приводит к частичному измельчению крупных зерен, в объеме зерен практически не наблюдаются малоугловые границы, пластическая деформация локализуется преимущественно вдоль границ кристаллитов.

Исследования проведены с использованием оборудования Томского регионального центра коллективного пользования ТГУ.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Chen J.M., Chernov V.M., Kurtz R.J. et al. // Journal of Nuclear Materials – 2011. – № 417. – Р. 289–294.
2. Тюменцев А.Н., Дитенберг И.А., Гриняев К.В. и т.д. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез – 2014. – Т. 37. – вып. 1. – С. 18–26.
3. Тюменцев А.Н., Овчинников С.В., Дитенберг И.А. и т.д. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез – 2014. – Т. 37. – вып. 1. – С. 27–33.

4. Electron backscatter diffraction in materials science / edited by Adam J. Schwartz, Mikul Kumar, Brent L. Adams – New York: Kluwer Academic / Plenum Publishers, 2000.